

# ダンパーが不均等配置された多層パッシブ制振構造の応答予測

## RESPONSE EVALUATION OF PASSIVELY CONTROLLED MULTISTORY BUILDING WITH NON-UNIFORM DAMPER DISTRIBUTION

竹内 徹<sup>\*1</sup>, 市川 康<sup>\*2</sup>, 中島秀雄<sup>\*3</sup>, 笠井和彦<sup>\*4</sup>  
Toru TAKEUCHI, Yasushi ICHIKAWA, Hideo NAKASHIMA  
and Kazuhiko KASAI

In designing passively vibration-controlled buildings, it is difficult for the designers to evaluate the response with various types of dampers, especially the dampers cannot be distributed uniformly because of architectural limitations. Trial-and-error-based design with time history analyses does not necessarily promote understanding the relationship between damper layout and their effects. The present paper proposes simplified response estimation methods for passively vibration-controlled multistory buildings with elasto-plastic damper and visco-elastic damper systems including non-uniform distributions. In these methods various equivalent linearization techniques are introduced, and their accuracies are compared with time-history analyses.

**Keywords :** *Vibration Control, Equivalent Linearization, Elasto-plastic Damper, Viscoelastic Damper*  
パッシブ制振構造, 等価線形化法, 弾塑性ダンパー, 粘弾性ダンパー

### 1. 序

建物架構内に各種の減衰機構(ダンパー)を配置して大地震時の主構造を弾性域に留め、建物の損傷制御を行うパッシブ制振構造は、各種のダンパーの実用化とともに一般的になりつつある<sup>1)</sup>。こういった非線形性を伴う構造物の応答を予測する代表的な方法として時刻歴応答解析があるが、その結果は個別の入力地震動に対する特解であり、ダンパーの種類や投入量と応答の関係を包括的に把握することは難しい。このため、地震波の応答スペクトル特性に基づき、ダンパーを含む構造物の動的特性と地震波の特性を関連づけながら、最大応答を簡易に予測する手法が検討されてきた。中でも Newmark and Rosenblueth<sup>2)</sup>, Iwan<sup>3)</sup>, Gulkan<sup>4)</sup>, Shibata and Sozen<sup>5)</sup>らにより展開されてきた等価線形化手法は、ダンパーの特性を付加剛性と付加減衰として評価できるため、直感的に理解しやすい利点を有している。最近では、石丸ら<sup>6)</sup>による複素数を用いたモード間の位相差の表現や、瞬間エネルギー入力による評価<sup>9)</sup>など、多様な応用が試みられている。

筆者らは最も簡便な手法の一つである応答スペクトルによる評価を目的とし、1質点系の弾性構造に各種のダンパーを付加したときの等価剛性および等価減衰を同じ次元で比較し、応答に与える影響を簡易な評価式で表現することにより、その応答低減効果を一律に比較できる資料を提供してきた<sup>10)-13)</sup>。

また、各層のダンパー剛性を主構造剛性に対し一定の比率で配置することにより、多質点骨組においても1質点系の予測値と同様の応答低減効果が得られることを示した<sup>14)-15)</sup>。しかし現実の設計においては、建築計画上または建築生産上の理由により、ダンパー配置に制限が与えられる場合も多い。幾つかのダンパー配置案を準備し、その優劣を比較・選択する構造設計法も一般的に行われていることから、任意のダンパー配置に対し、時刻歴応答解析を用いずに簡易的に応答を予測できる手法があれば、構造計画に極めて有用である。

1質点系の等価線形化手法を多質点骨組に拡張する手法は数多く試みられているが<sup>16)-17)</sup>、その一方で多層骨組の塑性化に伴う層毎の損傷分布が等価置換の前提となる弾性系と異なる可能性があることから、弾性応答せん断力分布より求めた崩壊形を塑性領域の多層骨組にそのまま適用することの危険性が指摘されている<sup>18)-19)</sup>。ただし極めて稀に生ずるレベルの地震動に対しても、主構造を弾性域にとどめるパッシブ制振構造では、ダンパーの負担率が限定されていれば、損傷分布が予想し得る範囲内にとどまり、実用に耐えうる信頼性を確保できるものと考えられる。その精度とダンパー量との関係を検討した研究は殆ど見られない。

そこで本論文では中高層建物など地震に対する速度応答スペクトルが概ね一定領域となる1次固有周期をもつ建物を想

<sup>\*1</sup> 東京工業大学建築学専攻 助教授・博士(工学)

<sup>\*2</sup> 新日本製鉄(株)建築事業部 マネージャー・工修

<sup>\*3</sup> 清水建設(株)構造設計部 副部長・工修

<sup>\*4</sup> 東京工業大学建築物理研究センター 教授・Ph.D.

Assoc. Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Senior Manager, Nippon Steel Corp., M. Eng.

Senior Manager, Shimizu Corp., M. Eng.

Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Ph.D.

定し、 $A_i$  分布則を利用して 1 質点系で提案した簡易予測手法を多質点骨組の応答予測に展開した場合の精度および適用限界を、ダンパーが不均等配置された多層骨組を用いて検証する。適用限界については、ダンパー・主構造剛性比が増加することによる評価精度への影響および特定層への損傷集中度を分析することにより、同手法の適用が可能なダンパー量の限界について検討する。

鋼材ダンパー等の弾塑性ダンパーの等価剛性および等価減衰率は塑性率の関数となるため、応答低減率を求める過程においては通常、図式解法または収斂計算を行う必要が生ずる。本論では、図式解法および収斂計算を必要とせず直接解を得る減衰評価法についても提案を行う。

## 2. 多層パッシブ制振構造の応答予測法の設定

本論においては応答予測法を誘導する前提条件として、以下を満足するものとする。

- ダンパーの種類と配置は仮定されているものとする。
- 設計検討範囲において主構造は弾性範囲内に留まる。
- ダンパー付加前の主構造は、その応答せん断力分布が概ね  $A_i$  分布に近くなる規模および特性を有する。
- 対象とする入力地震動は速度応答スペクトル一定領域を持ち、ダンパー付加前後の構造物はこの範囲に 1 次固有周期を持つ。
- 架構の曲げ変形は無視し得るか、等価なせん断モデルで表現できる特性を有する。

以上の前提において、本論で提案する多質点系パッシブ制振構造の応答評価手法を以下のように設定する。

まず各層の質量を  $m_i$ 、ダンパー付加前の主構造のみの剛性を  $K_{fi}$ 、荷重分布を  $A_i$  分布としたときの各層のせん断力  $Q_i$  のベースシアー  $Q_b$  に対する割合  $B_i$  から、下式により縮約 1 自由度系での等価質量  $M_{eq}^{(0)}$  および固有周期  $T_{eq}^{(0)}$  を算定し、 $T_{eq}^{(0)}$  とこれに対応する加速度応答スペクトル  $S_{pa}(T_{eq}^{(0)}, h_0)$  からフレームのみの応答ベースシアー  $Q_b^{(0)} = S_{pa}(T_{eq}^{(0)}, h_0) \cdot M_{eq}^{(0)}$  および各階の応答層間変形  $\Delta u_i^{(0)} = B_i Q_b^{(0)} / K_{fi}$  を求める<sup>7)</sup>。ここで  $u_i^{(0)}$  は  $i$  層の水平変位を表す。

$$M_{eq}^{(0)} = \left( \sum_{i=1}^N m_i \cdot u_i^{(0)} \right)^2 / \sum_{i=1}^N m_i \cdot u_i^{(0)2} = \left( \sum_{i=1}^N m_i \sum_{j=1}^i \frac{B_j}{K_{fj}} \right)^2 / \sum_{i=1}^N m_i \left( \sum_{j=1}^i \frac{B_j}{K_{fj}} \right)^2 \quad (1)$$

$$T_{eq}^{(0)} = 2\pi \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[ m_i \cdot \frac{u_i^{(0)}}{Q_b^{(0)}} \right]} = 2\pi \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[ m_i \sum_{j=1}^i \left( \frac{B_j}{K_{fj}} \right) \right]} \quad (2)$$

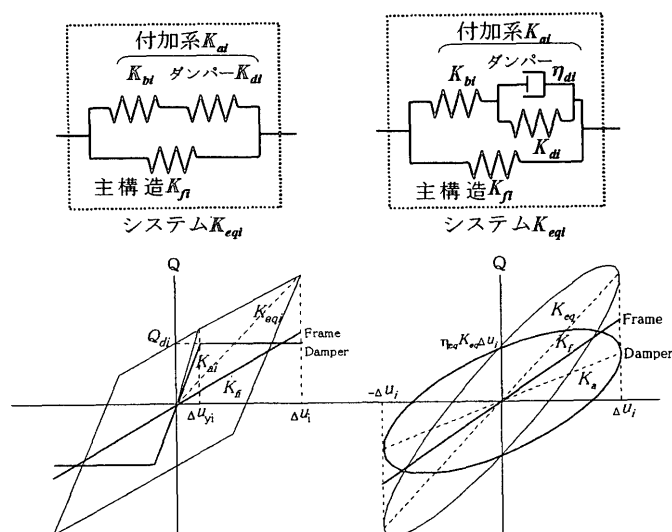
次にダンパー量の指標となる値を算定する。弾塑性ダンパーでは  $K_{ai}/K_{fi}$  および降伏時層間変形角  $\theta_{fi}$ 、粘弾性ダンパーでは  $K_{ai}/K_{fi}$  および損失係数  $\eta_{di}$  が指標となる<sup>15)</sup>。ここで  $K_{ai}$  は図 1 に示す接合部・ブレース・支持材などの直列に配置された周辺剛性を考慮したダンパー付加系の剛性であり、以下の各式で評価できる<sup>11)</sup>。

弾塑性ダンパーにおいて、 $K_{ai} = K_{di} / (1 + K_{di}/K_{bi})$  (3)

粘弾性ダンパーにおいて、 $K_{ai} = K_{di} / (1/\Gamma_{di} + K_{di}/K_{bi})$  (4)

$$\Gamma_{di} = 1 + \eta_{di}^2 / (1 + K_{bi}/K_{di}) \quad (5)$$

ただし  $K_{fi}$  は各層のフレームのみの剛性、 $K_{di}$  は各層のダンパーの剛性、 $K_{bi}$  は各層のダンパー周辺部の剛性である。粘弾性ダンパーの剛性・損失係数は振動数に依存するため、正確には (4) 式には収



(a) 弾塑性ダンパーの場合 (b) 粘弾性ダンパーの場合

図 1 ダンパー付きシステムの履歴モデル

斂計算が必要となる<sup>20)</sup>が、ここでは  $K_{ai}$  が与えられたものとして進める。現実の設計においては弾塑性ダンパーでは  $K_{ai}/K_{fi} = 0.5 \sim 2.0$ 、粘弾性ダンパーでは  $K_{ai}/K_{fi} = 0.3 \sim 1.0$  (20°C) 程度で配置される場合が多い。摩擦ダンパー、粘性ダンパーは接合部剛性を考慮することにより初期剛性が現れるので、それぞれ弾塑性ダンパー、粘弾性ダンパーに準じ評価することができる。以降、 $K_{ai}/K_{fi}$ 、 $\theta_{fi}$ 、 $\eta_{di}$  の指標が各層で一定となるダンパー配置を均等配置と呼び、ダンパー配置がこれより外れた不均等配置を含めて応答評価を考える。

続いてシステムとしての等価剛性および等価減衰定数を求める。弾塑性ダンパーの場合は図 1(a) より、 $\Delta u_i^{(0)}$  をもとにシステムの塑性率  $\mu_i^{(0)} = \Delta u_i^{(0)} / \Delta u_{yi}$  を算定し下式で各層の等価剛性  $K_{eqi}^{(1)}$  を求めることができる。

$$K_{eqi}^{(1)} = \frac{(K_{ai} + \mu_i^{(0)} K_{fi})}{\mu_i^{(0)}} = K_{fi} + \frac{K_{ai}}{\mu_i^{(0)}} \quad (6)$$

また、履歴ループによって囲まれた面積  $E_d$  から、定常振幅での等価減衰定数は塑性率  $\mu_i^{(0)}$  と  $K_{ai}/K_{fi}$  を用い下式で表現できる。

$$h'_{eqi}^{(1)} = \frac{E_d}{2\pi K_{eqi}^{(1)} (\Delta u_i^{(0)})^2} = \frac{2(\mu_i^{(0)} - 1) K_{ai}/K_{fi}}{\pi \mu_i^{(0)} (\mu_i^{(0)} + K_{ai}/K_{fi})} \quad (7)$$

上式は最大応答定常振幅時の等価減衰であり、地震動応答は多様な振幅を持つランダム応答であるため、補正を行う必要がある。一つの方法は文献 17 で示されているように  $h'_{eqi}^{(1)}$  を一律に低減させ、下式で等価減衰を求める方法である。

$$h_{eqi}^{(1)} = h_0 + 0.8 h'_{eqi}^{(1)} \quad (8)$$

$h_0$  はダンパー付加前の構造減衰定数である。もう一つの方法としては、定常振幅での等価付加減衰定数の  $\mu = 1$  から最大値までの積分平均値として下式により求めるものがある<sup>2)3)11)</sup>。本論ではこちらの方法を採用する。

$$h_{eqi}^{(1)} = h_0 + \frac{1}{\mu_i^{(0)}} \int_1^{\mu_i^{(0)}} h'_{eqi}^{(1)}(\mu) d\mu \\ = h_0 + \frac{2(1 + K_{ai}/K_{fi})}{\pi \mu_i^{(0)}} \ln \frac{\mu_i^{(0)} + K_{ai}/K_{fi}}{(1 + K_{ai}/K_{fi}) \left( \mu_i^{(0)} \right)^{1 + K_{ai}/K_{fi}}} \quad (9)$$

ただし積分中の  $h'_{eqi}{}^{(1)}(\mu)$  は式(7)の  $\mu_i^{(0)}$  を変数  $\mu$  に置換したものである。粘弾性ダンパーの場合は、図1(b)より下式により各層の等価剛性、等価付加減衰を求めることができる<sup>10)</sup>。

$$K_{eqi}{}^{(1)} = K_{fi} \left( 1 + \frac{K_{di}}{K_{fi}} \right) = K_{fi} \left( 1 + \frac{1}{\frac{K_{di}}{K_{fi}} + \frac{K_{fi}}{K_{bi}}} \right) \quad (10)$$

$$h_{eqi}{}^{(1)} = h_0 + \frac{\eta_{di}}{1 + (1 + \eta_{di}^2) \frac{K_{di}}{K_{bi}}} \frac{1}{2 \left( 1 + \frac{K_{fi}}{K_{di}} + \frac{K_{fi}}{K_{bi}} \right)} \quad (11)$$

次に、各層の等価減衰  $h_{eqi}{}^{(1)}$  を各層の弾性歪エネルギーにより重み付けし、建物全体の等価減衰定数  $h_{eq}{}^{(1)}$  を次式で評価する。

$$h_{eq}{}^{(1)} = \frac{\sum_{i=1}^N h_{eqi}{}^{(1)} \cdot W_i{}^{(1)}}{\sum_{i=1}^N W_i{}^{(1)}} \quad (12)$$

$$W_i{}^{(1)} = \frac{(B_i Q_B{}^{(1)})^2}{2 K_{eqi}{}^{(1)}} \quad (13)$$

ダンパー剛性を考慮した等価1自由度系の固有周期  $T_{eq}$  および等価質量  $M_{eq}$  は下式により求まる。

$$T_{eq}{}^{(1)} = 2\pi \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[ m_i \sum_{j=1}^i \left( \frac{B_j}{K_{eqj}{}^{(1)}} \right) \right]} \quad (14)$$

$$M_{eq}{}^{(1)} = \left( \sum_{i=1}^N m_i \sum_{j=1}^i \frac{B_j}{K_{eqj}{}^{(1)}} \right)^2 / \sum_{i=1}^N m_i \left( \sum_{j=1}^i \frac{B_j}{K_{eqj}{}^{(1)}} \right)^2 \quad (15)$$

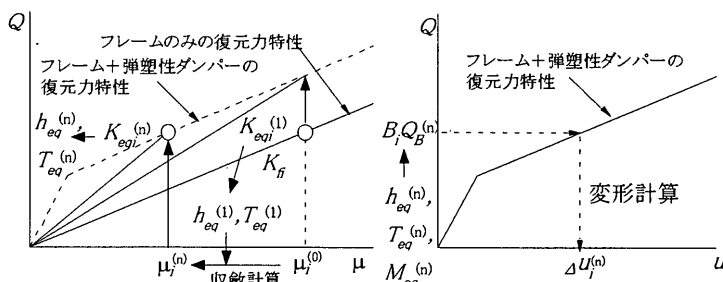
初期減衰  $h_0$  による応答スペクトル値が、等価減衰  $h_{eq}$  において低減する割合を表す減衰効果係数  $D_h{}^{(1)}$  は(16)式で評価する。観測地震波では  $\alpha = 2.5$  が適しているが、後に検証する人工地震波に対する検証では  $\alpha = 7.5$  を使用する<sup>13)</sup>。

$$D_h{}^{(1)} = \sqrt{\frac{1 + \alpha h_0}{1 + \alpha h_{eq}{}^{(1)}}} \quad (16)$$

また弾塑性ダンパーなど収束を必要とする機構では(17)式により新たな塑性率  $\mu_i^{(n)}$  を求め、 $\mu_i^{(n)}$  が安定した値となるまで(6)～(9)式および(12)～(17)式の過程を繰り返す。

$$\mu_i^{(n)} = \mu_i^{(0)} \cdot D_h{}^{(n)} \frac{T_{eq}{}^{(n)}}{T_{eq}{}^{(0)}} \quad (17)$$

弾塑性ダンパーシステムにおける  $\mu_i^{(n)}$  の等価線形化における収束過程の概念図を図2(a)に示す。安定した  $\mu_i^{(n)}$  が得られれば、



(a) 式(6)～(17)の計算 (b) 式(18)(19)の計算  
図2 弾塑性ダンパーを持つシステムの等価線形化における収束過程

低減されたベースシェアー  $Q_B{}^{(n)}$  を(18)式により求め、Ai分布による各層のせん断力  $B_i Q_B{}^{(n)}$  を求めることができる。

$$Q_B{}^{(n)} = Q_B{}^{(0)} \cdot D_h{}^{(n)} \frac{T_{eq}{}^{(0)} M_{eq}{}^{(0)}}{T_{eq}{}^{(n)} M_{eq}{}^{(n)}} \quad (18)$$

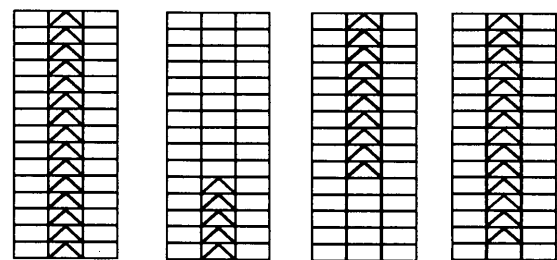
(17),(18)式は速度応答スペクトル一定領域に対応している。最後に、図2(b)に示すように各層のせん断力  $B_i Q_B{}^{(n)}$  および復元力特性から各層の層間変形  $\Delta u_i^{(n)}$  を下式により求める。

$$\Delta u_i^{(n)} = (B_i Q_B{}^{(n)} - K_{di} \Delta u_i^{(n)}) / K_{fi} \quad (19)$$

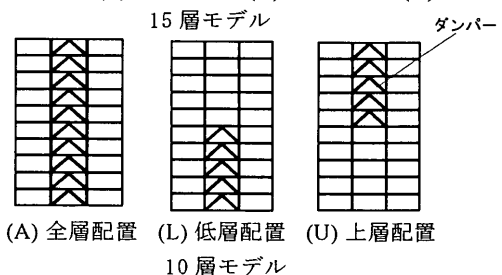
上記予測手法は、ダンパーが2章で定義した均等配置から外れても、最大応答せん断力分布は概ねAi分布比に従う、という仮定に拠っている。計算は全て表計算により行うことが可能であり、固有値解析および時刻歴応答解析を必要としない。なお、(6)～(9)式および(12)～(17)式の収束過程において、ダンパーの剛性変化による等価減衰への影響は(9)式で考慮しているが、 $\mu_i^{(n)}$  の層間の分布は収束初期に得られたものから変化させていない。これは  $\mu_i^{(n)}$  の層間比率の変化が、全体の固有周期  $T_{eq}{}^{(n)}$  および等価減衰定数  $h_{eq}{}^{(n)}$  に与える影響は小さいという前提による。従って、収束終了時の  $\mu_i^{(n)}$  分布は、最終的に得られた  $\Delta u_i^{(n)}$  とは対応していないことに留意する必要がある。上記前提では減衰評価に使用する層間変位分布にダンパー付加前のものを使用するため  $K_{di}/K_{fi}$  が大きくなると誤差が増大することが予想される。この問題は最終的に得られた変位分布を用いて最初から計算を繰り返すことによって補正することが可能と考えられるが、本論ではまずこの補正を行わない状態での精度検証を行う。

### 3. 時刻歴応答解析との比較による検証

前章で設定した予測法を、ダンパーが不均等に配置された多層モデルについて適用し、時刻歴応答結果と比較することでその精度を検証する。多層モデルは図3及び表3に示すような実建物より抽出した15層、10層モデルとし、極端なダンパーの不均等配置例として、全層配置(A)の他、低層配置(L)、上層配置(U)および15層モデルについては最下層のみダンパーを除外したケース(G)を設定する。振動モデルは等価せん断型、1階床位置



(A) 全層配置 (L) 低層配置 (U) 上層配置 (G) 1層除



(A) 全層配置 (L) 低層配置 (U) 上層配置  
10層モデル

図3 検証モデルにおけるダンパーの配置パターン

固定の質点系モデルとし、構造減衰はダンパー付加前の主構造剛性に対し $h_0=0.02$ の剛性比例型とした。ダンパー付加前の15層モデル、10層モデルの1次固有周期はそれぞれ2.00秒、1.34秒であり、共にAi分布のせん断力に対し上層がやや層間変形が小さくなる剛性分布を有している。採用地震波は設計用入力地震動作成手法技術指針<sup>21)</sup>のレベル2水平動基準応答スペクトルに対応した模擬地震波とし、予測値の評価において地震波応答スペクトルの乱れを排除するため、BCJ-L2、El Centro NS波位相、Hachinohe NS波位相を用いた地震波を作成し地表より入力した。

#### 1) 弾塑性ダンパーにおける検証

弾塑性ダンパーについては $\theta_{yi}$ と $K_{ai}/K_{fi}$ をパラメーターとし、表1に示すように、15層モデルで10ケース、10層モデルで9ケースについて前章で設定した予測法により層せん断力と層間変形角を求めて時刻歴応答解析と比較する。 $K_{ai}/K_{fi}=1.0$ かつ $\theta_{yi}=1/$

500、 $K_{ai}/K_{fi}=2.0$ かつ $\theta_{yi}=1/500$ 、 $K_{ai}/K_{fi}=1.0$ かつ $\theta_{yi}=1/1000$ の3ケースについて、それぞれダンパー配置層を変化させている。なお、弾塑性ダンパーは同鋼種、同角度でせん断変形卓越型主構造に取り付けられたブレース型ダンパーを想定し、各層の $\theta_{yi}$ をモデル毎に一定としている。全57ケースのうち、BCJ-L2波に対する建物モデル、ダンパー配置階が異なる9ケースについての比較結果を図4に示す。各図において実線および点線が式(1)～(19)による予測値、●および○が時刻歴応答解析による結果である。

ダンパーを全層に配置したAのシリーズではEP10-1Aでやや予測値が解析値を上回るものの、層せん断力、層間変形角共に予測値は解析値と概ね良く対応している。ダンパーを下層階に配置したLのシリーズでは下層部分で予測値と解析値がやや前後しているが全体的な応答性状は良く対応しており、特にダンパーを配置した下層階で層間変形角が低減される様子が、Ai

表1 検証ケース(弾塑性ダンパー)

| Case    | Story | $K_{ai}/K_{fi}$ | $\theta_{yi}$ | Damper Position   |
|---------|-------|-----------------|---------------|-------------------|
| EP15-1A | 15    | 1.0             | 0.002         | All floors        |
| EP15-1L | 15    | 1.0             | 0.002         | 1-5 floor only    |
| EP15-1U | 15    | 1.0             | 0.002         | 6-15 floor only   |
| EP15-1G | 15    | 1.0             | 0.002         | 2-5 floor (no 1F) |
| EP15-2A | 15    | 2.0             | 0.002         | All floors        |
| EP15-2L | 15    | 2.0             | 0.002         | 1-5 floor only    |
| EP15-2U | 15    | 2.0             | 0.002         | 6-15 floor only   |
| EP15-3A | 15    | 1.0             | 0.001         | All floors        |
| EP15-3L | 15    | 1.0             | 0.001         | 1-5 floor only    |
| EP15-3U | 15    | 1.0             | 0.001         | 6-15 floor only   |
| EP10-1A | 10    | 1.0             | 0.002         | All floors        |
| EP10-1L | 10    | 1.0             | 0.002         | 1-5 floor only    |
| EP10-1U | 10    | 1.0             | 0.002         | 6-10 floor only   |
| EP10-2A | 10    | 2.0             | 0.002         | All floors        |
| EP10-2L | 10    | 2.0             | 0.002         | 1-5 floor only    |
| EP10-2U | 10    | 2.0             | 0.002         | 6-10 floor only   |
| EP10-3A | 10    | 1.0             | 0.001         | All floors        |
| EP10-3L | 10    | 1.0             | 0.001         | 1-5 floor only    |
| EP10-3U | 10    | 1.0             | 0.001         | 6-10 floor only   |

表2 検証ケース(粘弾性ダンパー)

| Case    | Story | $K_{ai}/K_{fi}$ | $\eta_{di}$ | Damper Position    |
|---------|-------|-----------------|-------------|--------------------|
| VE15-1A | 15    | 0.5             | 1.0         | All floors         |
| VE15-1L | 15    | 0.5             | 1.0         | 1-5 floor only     |
| VE15-1U | 15    | 0.5             | 1.0         | 6-15 floor only    |
| VE15-1G | 15    | 0.5             | 1.0         | 2-15 floor (no 1F) |
| VE15-2A | 15    | 1.0             | 1.0         | All floors         |
| VE15-2L | 15    | 1.0             | 1.0         | 1-5 floor only     |
| VE15-2U | 15    | 1.0             | 1.0         | 6-15 floor only    |
| VE15-3A | 15    | 0.5             | 0.5         | All floors         |
| VE15-3L | 15    | 0.5             | 0.5         | 1-5 floor only     |
| VE15-3U | 15    | 0.5             | 0.5         | 6-15 floor only    |
| VE10-1A | 10    | 0.5             | 1.0         | All floors         |
| VE10-1L | 10    | 0.5             | 1.0         | 1-5 floor only     |
| VE10-1U | 10    | 0.5             | 1.0         | 6-10 floor only    |
| VE10-2A | 10    | 1.0             | 1.0         | All floors         |
| VE10-2L | 10    | 1.0             | 1.0         | 1-5 floor only     |
| VE10-2U | 10    | 1.0             | 1.0         | 6-10 floor only    |
| VE10-3A | 10    | 0.5             | 0.5         | All floors         |
| VE10-3L | 10    | 0.5             | 0.5         | 1-5 floor only     |
| VE10-3U | 10    | 0.5             | 0.5         | 6-10 floor only    |

表3 検討モデル主構造の構造特性(15層モデル)

| 階  | 質量 (t) | 剛性 (kN/mm) |
|----|--------|------------|
| 15 | 581    | 250        |
| 14 | 430    | 273        |
| 13 | 430    | 302        |
| 12 | 430    | 311        |
| 11 | 430    | 328        |
| 10 | 430    | 342        |
| 9  | 434    | 352        |
| 8  | 438    | 372        |
| 7  | 438    | 408        |
| 6  | 438    | 410        |
| 5  | 438    | 442        |
| 4  | 438    | 454        |
| 3  | 438    | 487        |
| 2  | 480    | 546        |
| 1  | 480    | 581        |

(10層モデル)

| 階  | 質量 (t) | 剛性 (kN/mm) |
|----|--------|------------|
| 10 | 460    | 139        |
| 9  | 361    | 176        |
| 8  | 338    | 261        |
| 7  | 340    | 299        |
| 6  | 345    | 333        |
| 5  | 345    | 328        |
| 4  | 345    | 361        |
| 3  | 434    | 423        |
| 2  | 420    | 463        |
| 1  | 395    | 467        |

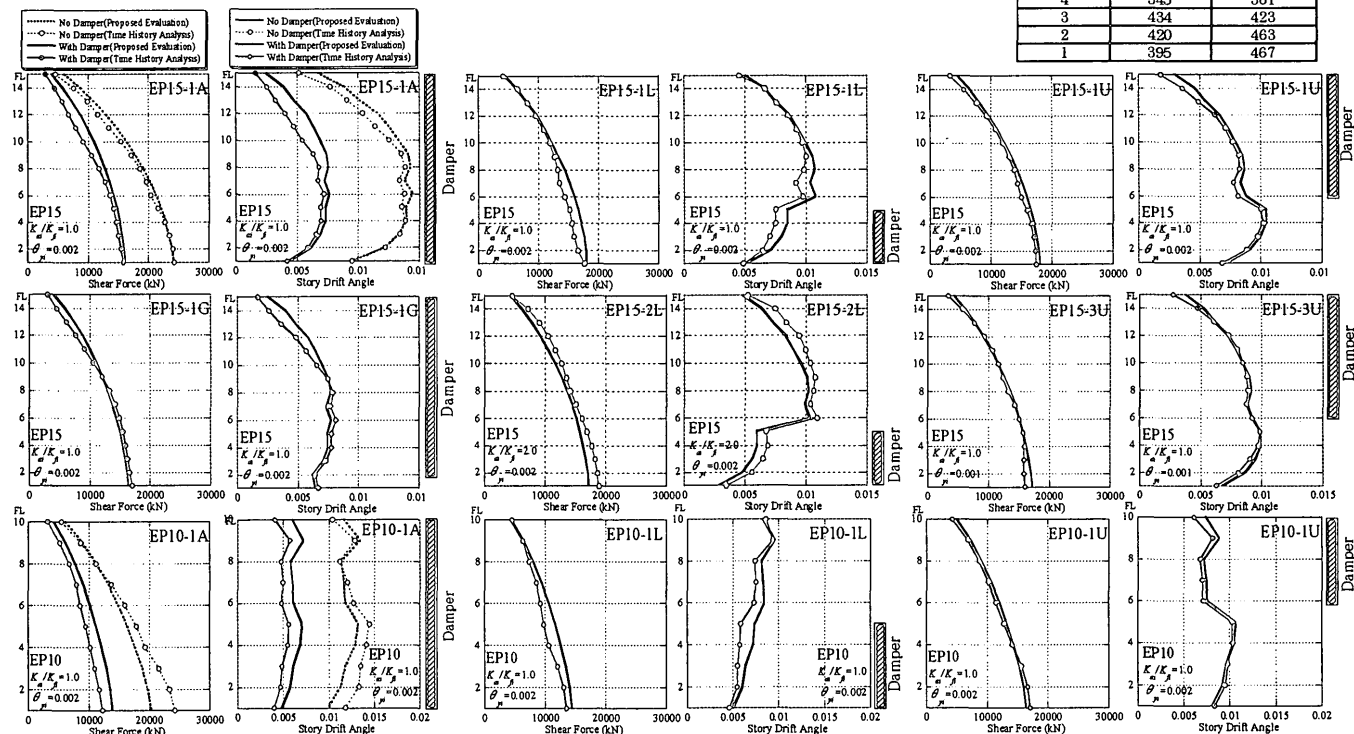


図4 ダンパーが不均等配置された弾塑性システムの応答

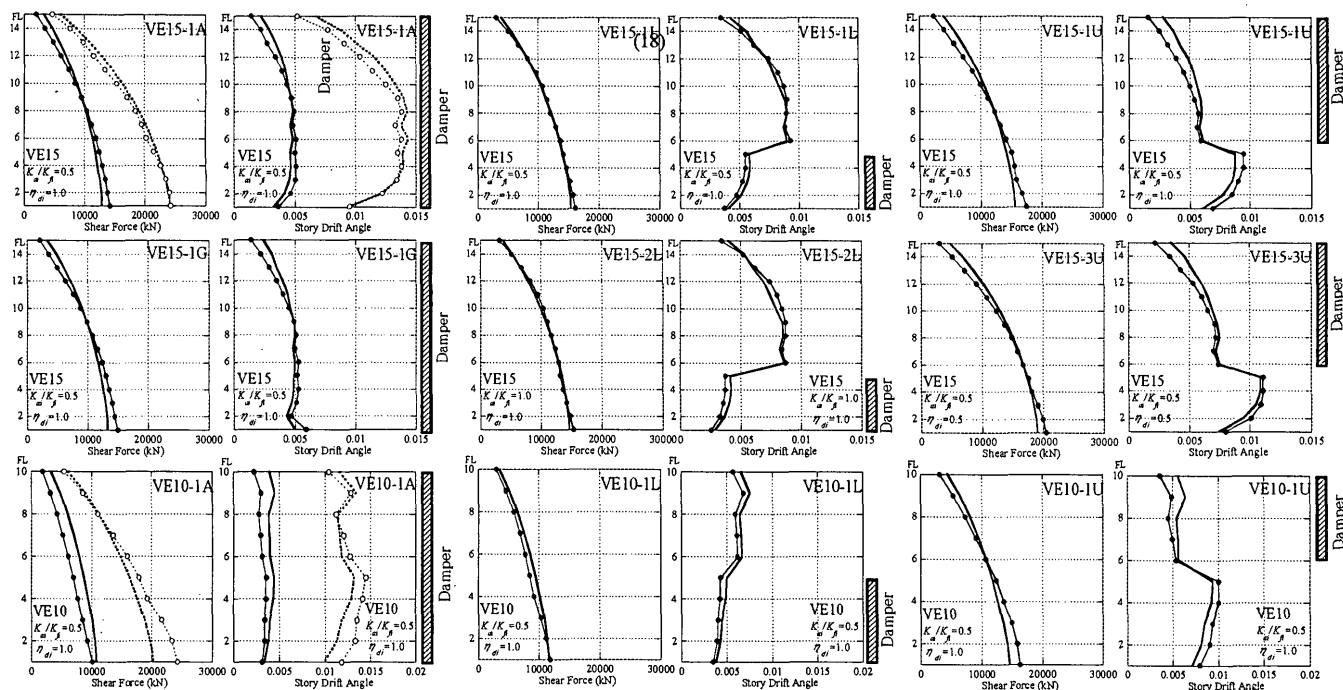


図5 ダンパーが不均等配置された粘弾性システムの応答

分布による層せん断力を前提として計算した層間変形角の予測値により表現できている。ダンパーを上層階に配置したケースでは、層せん断力、層間変形角共に解析値と予測値は良い対応を示している。1層でダンパーを除いたEP15-1Gでは上層階の層間変形角で予測値がやや高めめの値を示すが、1層での層間変形角が他の層に比べて大きくなる様子を表現できている。

## 2) 粘弾性ダンパーにおける検証

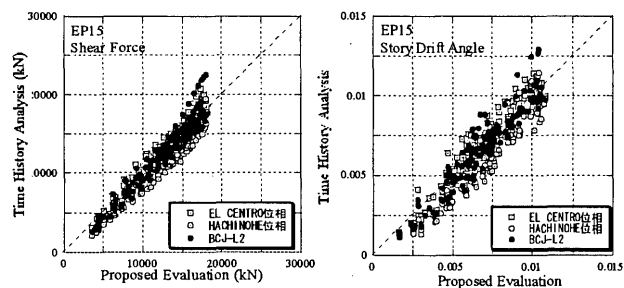
粘弾性ダンパーについては  $K_d/K_s$  および  $\eta_d$  をパラメーターとし、表2に示す19×3ケースについて弾塑性ダンパーと同様に予測法により求めた層せん断力、層間変形角と時刻歴応答解析とを比較することで検証する。 $K_d/K_s=0.5$  かつ  $\eta_d=1.0$ 、 $K_d/K_s=1.0$  かつ  $\eta_d=1.0$ 、 $K_d/K_s=0.5$  かつ  $\eta_d=0.5$  の3ケースについてそれぞれダンパー配置階を変えている。ただし粘弾性ダンパーの変形と層せん断力との位相差

を考慮し、層せん断力については下式による割増を行う<sup>12) 15)</sup>。

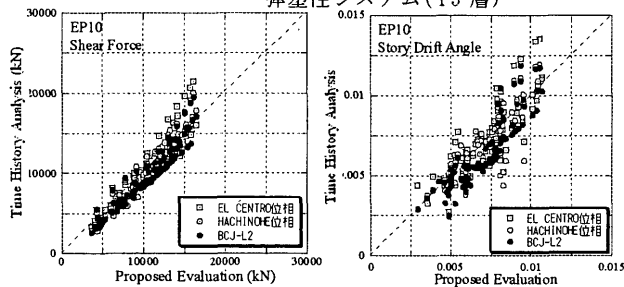
$$Q_B^{(n)} = Q_B^{(n)} \sqrt{1 + 4(h_{eq}^{(n)})^2} \quad (20)$$

時刻歴応答解析では、粘弾性ダンパーはKelvinモデルでモデル化している。建物モデル、配置階の異なる9ケースについての比較結果を図5に示す。

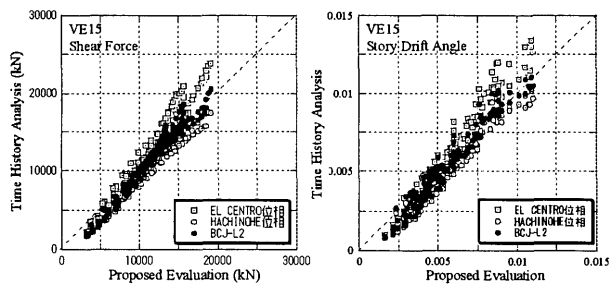
ダンパーが全層に配置されているケースでは10層モデルでやや予測値が解析値を上回るものの、予測法による値は解析値と概ね一致している。ダンパーが下層に配置されたケースでは層せん断力、層間変形角共に予測値と解析値の対応は良く、層間変形角におけるダンパー配置層での応答低減効果がAi分布前提の層せん断力分布による変形の予測により表現できている。ダンパーを上層に配置したケース



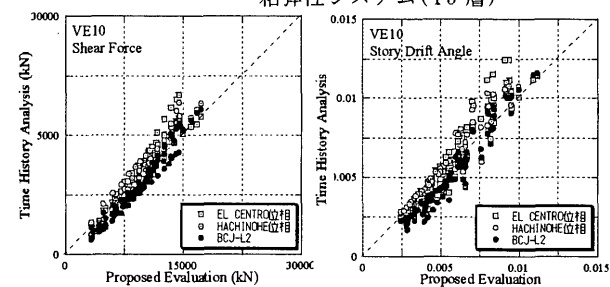
弾塑性システム(15層)



弾塑性システム(10層)



粘弾性システム(15層)



粘弾性システム(10層)

図6 評価法と時刻歴応答解析の比較

では上層部で予測値が解析値を上回る傾向が見られるが、予測値と解析値は概ね対応しており、ここでもダンパー配置層での層間変形角の応答低減効果が良く表現されている。1層でダンパーを除いたケースではダンパーが配置されていない1層で層間変形角がやや増加する状況が表現できている。

以上の結果を総合し、全検討ケースにおける各階の層せん断力、層間変形角について応答値と予測値を比較した結果を図6に示す。破線は応答値と予測値が一致する直線である。全体的に層せん断力はこの直線上に分布しており乱れは少ない。比較して層間変形角では乱れがやや大きい。提案した予測法は実用上充分使用できる精度で応答を予測していると考えられる。

ただし2章で述べたように、本予測法では減衰評価時の変位分布にダンパー付加前のものを使用しており、 $A_i$ 分布の前提となる固有周期も主構造のものを使用しているため、主構造に対するダンパー剛性比 $K_{ai}/K_{fi}$ が高い場合には、ダンパーを不均等配置することにより応答せん断力が $A_i$ 分布則より外れ予測法の精度が悪化することが予想される。そこでダンパー・主構造剛性比 $K_{ai}/K_{fi}$ を大きくした場合について精度の検証を行う。

#### 4. ダンパー・主構造剛性比と予測精度の関係

ダンパー・主構造剛性比 $K_{ai}/K_{fi}$ が大きい場合の本予測法の精度を検証する目的で、 $K_{ai}/K_{fi}$ を増加させた場合における時刻歴応答と予測値の比較を行う。対象とするモデルは前章で用いた15層モデルとし、ダンパーは全層配置と1～5層の低層配置とする。

##### 1) 弾塑性ダンパーでの検証結果

表4に弾塑性ダンパーでの検証ケースを示す。ダンパー／主構造剛性比は $K_{ai}/K_{fi} = 2.0, 3.0, 5.0$ 、 $\theta_{yi} = 1/1000, 1/500$ とし、地震波は3章と同様とする。図7に各層の層せん断力及び層間変形角をプロットした検証結果を示す。また解析値と予測値が一致する直線とそれに対し $\pm 15\%$ の誤差を示す直線を点線で示している。 $K_{ai}/K_{fi} = 2.0$ の場合、層せん断力は $\pm 15\%$ の範囲にほぼ入っており高い精度を示している。一方、層間変形角については $\pm 15\%$ の範囲からやや逸脱する部分も見られる。 $K_{ai}/K_{fi}$ が上がるにつれて層せん断力は $\pm 15\%$ の範囲から逸脱する部分が多くなり、特に $K_{ai}/K_{fi} = 5.0$ の層間変形角ではばらつきが大きい。図8にダンパー剛性比の増加とともに予測精度が悪化する場合の例(EP15-L, BCJ-L2)を示す。 $K_{ai}/K_{fi} = 5.0$ のケースではダンパーの無い上層部で予測値を大きく超える層間変形が発生していることがわかる。以上から、本予測法により応答値を予測する場合 $K_{ai}/K_{fi} = 2.0$ 程度が上限であると考えられる。

##### 2) 粘弾性ダンパーでの検証結果

表5に粘弾性ダンパーの検証ケースを示す。 $K_{ai}/K_{fi} = 1.0, 2.0, 3.0$ 、 $\eta_d = 0.5, 1.0$ としている。図9に検証結果を示す。 $K_{ai}/K_{fi} = 1.0$ では $\pm 15\%$ の範囲からやや逸脱する部分があるものの層せん断力、層間変形角共に直線上に分布し高い精度を示している。 $K_{ai}/K_{fi} = 2.0$ では $\pm 15\%$ から逸脱する点が増加すると共にばらつきも大きくなっている。 $K_{ai}/K_{fi} = 3.0$ ではさらにその傾向は強くばらつきが大きい。ただし弾塑性ダンパーと比較し、 $K_{ai}/K_{fi}$ が大きくなることによる乱れはやや小さい。以上より粘弾性ダンパーの場合は本予測法を $K_{ai}/K_{fi} = 1.0$ 程度を上限とし用いることが望ましいと考える。

#### 5. 弾塑性モデルにおける減衰定数評価式の提案

以上の検討により、提案した手法によって、ダンパー比率が一定値以下の範囲においては、ダンパーが2章で定義した均等配置より外れた場合でも応答がある程度の精度で予測できることが明らかになった。提案した手法において、鋼材ダンパーや摩擦ダンパー等の弾塑性型ダンパーでは応答低減後の変形と塑性率 $\mu$ の整合性を取るため、2章における式(6)～(17)の収斂計算を必要とし、この過程が評価手法を複雑にしている。作図法<sup>11)</sup>を用いれば $\mu$ の値は直接求めることができるが、陽な式の形で表現することができればより評価が容易になる。

先述したように、現在弾塑性系のランダム振動応答下での等価減衰定数の評価としては、(8)式による方法や(9)式による方法が使用されている<sup>17)11)</sup>。以降、前者を減衰低減法、後者を減衰平

表4 弾塑性ダンパーの剛性比増加検証ケース

| Case      | $K_{ai}/K_{fi}$ | $\theta_{yi}$ | Damper Position |
|-----------|-----------------|---------------|-----------------|
| EP15-2A-1 | 2.0             | 0.001         | All floors      |
| EP15-2L-1 | 2.0             | 0.001         | 1-5 floor only  |
| EP15-3A-1 | 3.0             | 0.001         | All floors      |
| EP15-3L-1 | 3.0             | 0.001         | 1-5 floor only  |
| EP15-5A-1 | 5.0             | 0.001         | All floors      |
| EP15-5L-1 | 5.0             | 0.001         | 1-5 floor only  |
| EP15-2A-2 | 2.0             | 0.002         | All floors      |
| EP15-2L-2 | 2.0             | 0.002         | 1-5 floor only  |
| EP15-3A-2 | 3.0             | 0.002         | All floors      |
| EP15-3L-2 | 3.0             | 0.002         | 1-5 floor only  |
| EP15-5A-2 | 5.0             | 0.002         | All floors      |
| EP15-5L-2 | 5.0             | 0.002         | 1-5 floor only  |

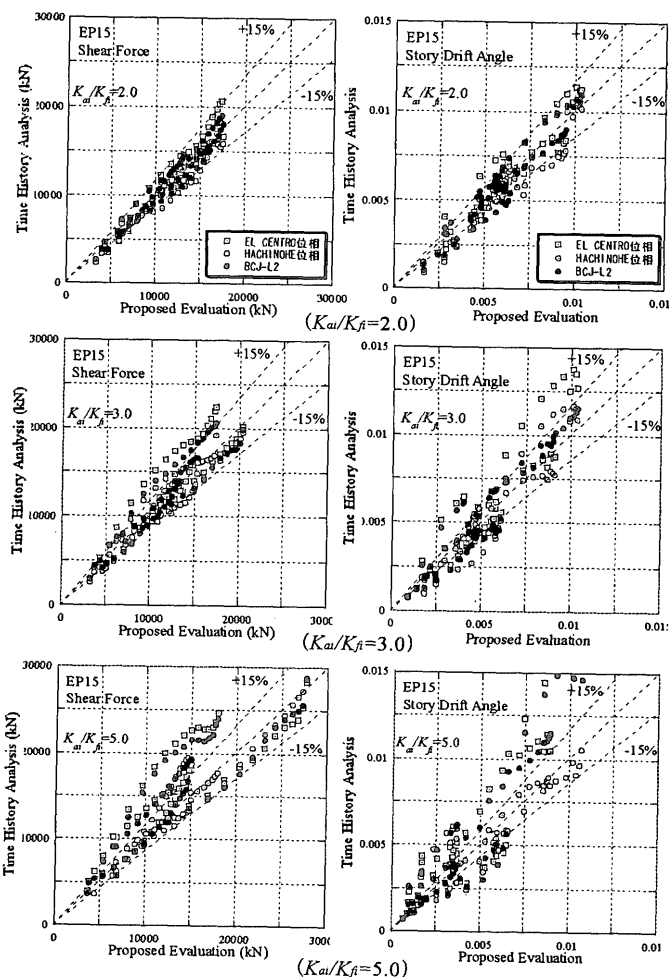


図7 弾塑性ダンパーの剛性比増加検証結果

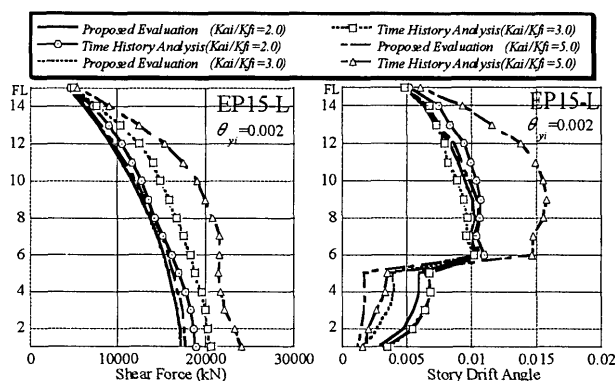


図8 ダンパー剛性比増加時の誤差例(弾塑性、BCJ-L2)

表5 粘弾性ダンパーの剛性比増加検証ケース

| Case       | $K_d/K_f$ | $\eta_d$ | Damper Position |
|------------|-----------|----------|-----------------|
| VE15-1A-05 | 1.0       | 0.5      | All floors      |
| VE15-1L-05 | 1.0       | 0.5      | 1-5 floor only  |
| VE15-2A-05 | 2.0       | 0.5      | All floors      |
| VE15-2L-05 | 2.0       | 0.5      | 1-5 floor only  |
| VE15-3A-05 | 3.0       | 0.5      | All floors      |
| VE15-3L-05 | 3.0       | 0.5      | 1-5 floor only  |
| VE15-1A-1  | 1.0       | 1.0      | All floors      |
| VE15-1L-1  | 1.0       | 1.0      | 1-5 floor only  |
| VE15-2A-1  | 2.0       | 1.0      | All floors      |
| VE15-2L-1  | 2.0       | 1.0      | 1-5 floor only  |
| VE15-3A-1  | 3.0       | 1.0      | All floors      |
| VE15-3L-1  | 3.0       | 1.0      | 1-5 floor only  |

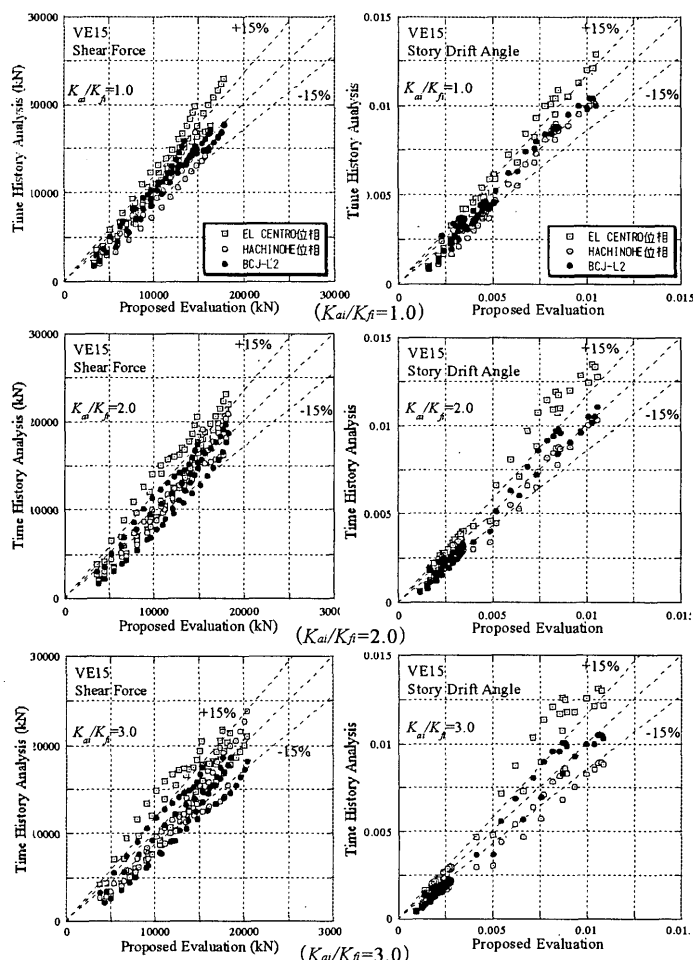


図9 粘弾性ダンパーの剛性比増加検証結果

均法と呼ぶことにする。図10に両方法の  $K_d/K_f = 0.5 \sim 2.0$  に対する等価減衰  $h_{eq}$ -塑性率  $\mu$  関係を示す。ただし  $h_0 = 0.02$  としている。

一点鎖線の減衰低減法が  $\mu = 2 \sim 4$  でピークを示しその後等価減衰が低下するのに対し、実線の減衰平均法では単調に等価減衰が増加し、 $\mu = 6$  を超える範囲より微減する特性を有している。本方法では減衰平均法を使用し一定の精度を確認していることから、(9)式を近似し、以下の形で表現する。

$$h_{eq} = a \left( 1 - \frac{1}{\mu} \right) \left( \frac{K_d}{K_f} \right)^b \quad (21)$$

$a=0.115$ 、 $b=0.55$  としたときの値を図10中に実線で示す。(21)式で表現した方法を減衰近似法と呼ぶことにする。減衰近似法による値は、減衰平均法による値と比較し  $\mu = 6$  以上でやや高くなっているが、ほぼ同等の分布を示している。岡野、宮本ら<sup>22)</sup>はコンクリート系構造物において原点指向型の復元力特性を持つ系の等価減衰が  $(1 - 1/\sqrt{\mu})$  の線形関数となる条件より、 $\mu$  の直接解を求めているが、ここでは鋼構造を想定し、完全弾塑性系の平均減衰を近似した(21)式より直接解を求める。

ダンパー付加後の応答変位の収束値  $\Delta u^{(n)}$  は速度応答スペクトル一定領域で成立する(17)式より以下のように表現できる。

$$\Delta u^{(n)} = \mu^{(n)} \Delta u_y = \Delta u^{(0)} D_h^{(n)} \sqrt{\frac{K_f}{K_{eq}}} \quad (22)$$

上式の  $K_{eq}$  に(6)式、 $D_h$  に(16)式を代入すると、次式を得る。

$$\left( \mu^{(n)} \frac{\Delta u_y}{\Delta u^{(0)}} \right)^2 = D_h^{(n)2} \frac{K_f}{K_{eq}} = \frac{1 + \alpha h_0}{1 + \alpha a \left( 1 - \frac{1}{\mu^{(n)}} \right) \left( \frac{K_d}{K_f} \right)^b} \frac{1}{1 + \frac{1}{\mu^{(n)}} \frac{K_d}{K_f}} \quad (23)$$

(23)式を解くことにより  $\mu^{(n)}$  を直接  $K_d/K_f$ 、 $\Delta u^{(0)}/\Delta u_y$  の関数として陽に表現することができる。

$\kappa = K_d/K_f$ 、 $\mu_f = \Delta u^{(0)}/\Delta u_y$  とおき、整理すると次式を得る。

$$\mu^{(n)} = \frac{\alpha \kappa^b (1 - \kappa) - \kappa}{2(1 + \alpha \kappa^b)} + \frac{\sqrt{\alpha^2 \kappa^{2b} (\kappa + 1)^2 + 2\alpha \kappa^{b+1} (\kappa + 1) + \kappa^2 + 4(1 + \alpha \kappa^b)(1 + \alpha h_0) \mu_f^2}}{2(1 + \alpha \kappa^b)} \quad (24)$$

(24)式を用いることによって、弾塑性系ダンパーの応答評価に際しても  $\mu$  の収斂計算をする必要がなくなり、直接解を求めることができる。表6に示すEP15-1の各ケースについて、 $\alpha=75$ 、 $a=0.115$ 、 $b=0.55$ 、 $h_0=0.02$  として(24)式を各階で(17)式の代わりに使用し応答予測した値を減衰近似法予測値とし、BCJ-L2を用いた時刻歴応答解析結果および収斂計

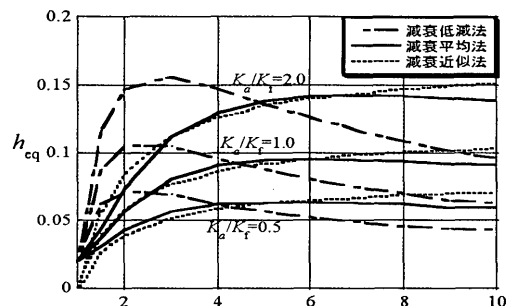


図10 塑性率と減衰定数の関係

表 6 減衰モデルの検証ケース

| Case    | $K_{ai}/K_f$ | $\theta_{yi}$ | Damper Position |
|---------|--------------|---------------|-----------------|
| EP15-1A | 1.0          | 0.002         | All Floors      |
| EP15-1L | 1.0          | 0.002         | 1-5 floor only  |
| EP15-1U | 1.0          | 0.002         | 6-15 floor only |

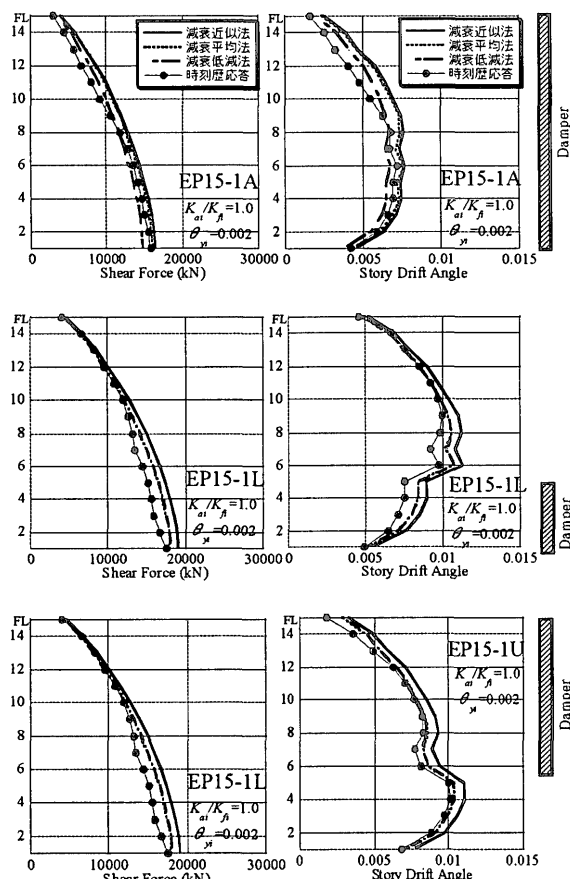


図 11 各減衰モデルによる評価 (BCJ-L2)

算による減衰平均法予測値・減衰低減法予測値と合わせて図 11 に示す。ただしダンパーの無い階では  $h_{eq} = h_0$  として評価している。EP15-1A では減衰低減法がやや低め、EP15-1L、1U では減衰近似法がやや高めの応答予測値を示す。各層のダンパーの最大塑性率は、前者で  $\mu = 2 \sim 3$  程度、後者で  $\mu = 3 \sim 5$  程度であることから、予測結果は図 10 に示す各手法の減衰定数の評価と対応しているといえる。いずれにしても減衰近似法により収斂計算を持ちいずに求めた応答予測値は、他の手法を用いた結果とほぼ同等の精度を有しており、減衰近似法の有効性が確認できる。

## 6. 結

主構造に各種ダンパーを付加し応答低減を図るパッシブ制振構造において、1 質点系で展開した応答評価法を応用し、多質点系における応答を直接評価する簡易手法を提案し、弾塑性系と粘弾性系のダンパーを付加した構造について予測精度の検討を行った。検討の結果を要約すると、以下のようになる。

1) 今回検討した 15 層および 10 層 (主構造 1 次固有周期 2.0 ~ 1.0 秒) の建物において、各層におけるダンパー/主構造剛性比  $K_{ai}/K_f \leq 2.0$  (弾塑性)、 $K_{ai}/K_f \leq 1.0$  (粘弾性) の範囲においては、ダンパーをあえて均等配置から外れて配置した構造においても、提案した応答評価法は概ね  $\pm 15\%$  程度の精度での予測が可能であった。

2)  $K_{ai}/K_f$  が上記の値を大きく超える範囲では、評価法の精度は悪化し、特定層への変形集中の危険性が高まると考えられる。今回の検討範囲では弾塑性で  $K_{ai}/K_f = 5.0$ 、粘弾性で  $K_{ai}/K_f = 3.0$  のケースで予測値を大きく逸脱する結果例が見られた。

3) 本予測法を適用するにあたり、ランダム振動に対する等価減衰定数を表現する手法として減衰平均法を近似した減衰近似法を提案した。本方法を用いることにより、弾塑性系ダンパーを用いた場合でも収斂計算や図式解法を行うことなく直接陽な式により解を求めることができる。

なお、本検討においては、ダンパーを不均等に配置し各方面より検討を行ったが、主構造に関しては高さ方向の剛性バランスの良い (建築基準法に定義された剛性率にして 0.6 以上) 骨組を用いた。主構造の層剛性分布特性がこれより大きく異なる場合の本予測法の適用性については、今後の課題とする。

## 謝 辞

本研究は、免震構造協会パッシブ制振委員会応答評価小委員会基本設計 WG において行われた研究を含んでおり、ご協力いただいた委員の方々に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 和田章、岩田衛、川合広樹ほか 2 名：損傷制御設計法、丸善、1998
- 2) N.M.Newmark and E.Rosenbluth: Fundamentals of Earthquake Engineering, Prentice-Hall Inc., 1971
- 3) W.D.Iwan and N.C.Gates: Estimating Earthquake Response of Simple Hysteretic Structures, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, pp.391-405, 1979
- 4) W.D.Iwan: Estimating Inelastic Response Spectra from Elastic Spectra, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1980, 8, pp.375-388
- 5) P.Gulkan and M.A.Sozen: Inelastic Response of Reinforced Concrete Structures to Earthquake Motions, ACI Journal, 71-12, pp.604-610, 1974
- 6) A.Shibata and M.A.Sozen: Substitute-Structure Method for Seismic Design in R/C, Proceedings, ASCE, Vol.102, st1, 1976.1
- 7) 柴田明徳：最新耐震構造解析、森北出版、1981
- 8) 石丸辰治、江原栄次、石垣秀典、森川和彦：パッシブ型制振構造の等価線形化による応答解析法、日本建築学会構造系論文集、No. 542, pp.91-98, 2001.4
- 9) 例えば、柿本和茂、曾田五月也：瞬間エネルギーに基づく粘性系制振補強構造の入力低減率、日本建築学会構造系論文集、No. 575, pp.49-56, 2004.1
- 10) Y.Fu, K.Kasai: Comparative Study of Frames Using Viscoelastic and Viscous Dampers, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.124, No.5, 513-522, 1998
- 11) K.Kasai, Y.Fu, A.Watanabe: Passive Control Systems for Seismic Damage Mitigation, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.124, No.5, 501-512, 1998
- 12) 笠井和彦：シンポジウム主旨及び制振性能に関する私見、第 1 回パッシブ制振構造シンポジウム論文集、東京工業大学建築物物理研究センター、pp.61-76, 2000.3
- 13) 笠井和彦、伊藤浩資、渡辺厚：等価線形化手法による一質点弾塑性構造の最大応答予測法、日本建築学会構造系論文集、No. 571, pp.53-62, 2003.9
- 14) 日本建築構造技術者協会：応答制御設計法、彰国社、2000.12
- 15) T.Takeuchi, K.Kasai, K.Oohara, H.Nakashima, Y.Kimura: Performance Evaluation and Design of Passively Controlled Building using Equivalent Linearization, Proc. Structural World Congress (SEWC) 2002, Yokohama, Japan, CD-ROM, T2-2-a-2
- 16) 五十田博、緑川光正、中澤峻幸：工学的基礎の加速度応答スペクトルを用いた建築物の耐震性能評価 その 9 等価 1 自由度系における等価減衰の評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、1999.9
- 17) 建設省住宅局建築指導課：平成 12 年 6 月施工 改正建築基準法 (2 年目施行) の解説、2000.7
- 18) 秋山宏：性能設計への期待と課題：日本建築学会関東支部シンポジウム「鋼構造の性能設計を考える」資料、2001.3, pp.3-10
- 19) 秋山宏：「等価線形化法に基づく応答評価式—エネルギーバランスに基づく考察と境界変形の超過確率の評価への適用—」に対する討論、日本建築学会構造系論文集、No. 567, pp.213-214, 2003.5
- 20) 笠井和彦、大熊深：Kelvin 体による線形粘弾性ダンパー簡易モデル化と精度に関する考察 (その 1：弾性・弾塑性フレームを持つ制振構造)、日本建築学会構造系論文集、No. 550, pp.71-78, 2001.12
- 21) 建設省建築研究所、財団法人日本建築センター：設計用入力地震動作成手法技術指針 (案)、1992.3
- 22) 岡野創、宮本祐司：等価線形化法に基づく応答評価式、日本建築学会構造系論文集、No. 562, pp.45-52, 2002.12
- 23) 竹内徹、市川康：等価線形化手法によるパッシブ制振構造の簡易応答評価、ダンパーが不均等配置された架構の応答評価、2002 第 3 回東京工業大学パッシブ制振構造シンポジウム論文集、pp.247-260, 2002.12
- 24) 日本免震構造協会：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル：4.8 簡易応答予測法の提案、2003.10

(2003年12月10日原稿受理、2004年6月1日採用決定)